

学校编码: 10384

学号: 23320061152597

分类号\_\_密级\_\_

UDC\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

基带自适应预失真技术的设计与实现

Design and Implementation of Base-band  
Adaptive Predistortion Technology

曹新容

指导教师姓名: 黄联芬副教授

专 业 名 称: 通信与信息系统

论文提交日期:

论文答辩时间:

学位授予日期:

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评阅人: \_\_\_\_\_

200 年    月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（        ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于        年        月        日解密，解密后适用上述授权。

（        ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年        月        日

厦门大学博硕士论文摘要库

## 摘要

数字移动通信技术的迅速发展,对无线信道的容量和数据传输速率的要求越来越高,需要采用频谱利用率更高的传输技术。由于通信系统中的很多非线性器件,特别是基站收发系统中的功率放大器的非线性,在频谱利用率提高的同时,增加了带外辐射,产生邻道干扰,直接影响着这些通信系统的性能参数和技术指标。所以,功率放大器的线性化研究具有重要的理论及实际应用价值。

本文针对当前宽带信号在高功率放大器上表现出来的非线性和记忆效应,讨论了当前具有极大发展前景的一种线性化技术——数字预失真技术。在详细地研究了几种经典记忆预失真算法的基础上,提出了两种改进预失真算法:LS/SVD 精简改进算法和基于 Hammerstein 模型的 LS 迭代改进算法。

LS/SVD 精简改进算法是在经典的 LS/SVD 算法的基础上,根据功率放大器的特性,精简函数表达式中的部分高阶次项,只保留对预失真器有较大作用的函数项,从而达到减少系统运算量和降低系统资源需求的目的,具有易于硬件实现的优点。但是该算法在一定程度上降低了预失真器的线性化性能,需要在实际操作中灵活应用。

基于 Hammerstein 模型的 LS 迭代改进算法采用简单的 Hammerstein 预失真器模型,将一次大运算量的矩阵运算改进为数次小运算量的矩阵迭代运算,在大大降低系统复杂度的基础上仍能取得满意的线性化效果。但是迭代运算需要较多的存储单元,增加了系统的资源需求,不利于硬件实现。

在 Matlab 软件平台上,对几种经典算法和两种改进算法进行仿真测试,证明了改进算法的有效性,在大大降低系统运算量的基础上,仍然可以达到与经典算法近似的线性化效果。

最后论文给出了系统在 FPGA 硬件平台上的设计、实现方案,完成了 FPGA 硬件平台的基带预失真放大器系统的关键技术功能仿真,验证了系统设计的正确性和算法的可行性。并提出了功率放大器线性化技术的进一步研究方向和建议。

**关键词:** 预失真算法; 功率放大器; 线性化技术

## Abstract

With the rapid development of digital mobile communication technology, requirement of the capacity and transmission speed of wireless channel is much higher. Therefore, spectrum with higher utility rate is needed. Meanwhile, in communication system, large numbers of nonlinear devices, especially power amplifiers, have the characteristic of nonlinearity, directly affecting the capability parameter and technology index of communication system. In this sense, the study of power amplifier linearization technology is of great value in theory and its application.

The dissertation discusses predistortion technology, one of linearization technologies. It could better overcome the nonlinearity and memory effect of power amplifier. Then the dissertation proposes two improved algorithms, which can achieve better linearization performances by using simpler operations and requiring less resource.

One is LS/SVD simply algorithm. It bases on classical LS/SVD algorithm and subtracts the high order terms. So the algorithm requires less resource, needs simpler operations, but achieves little less linearization performances than classical LS/SVD algorithm. The other is LS iterative algorithm. It bases on Hammerstein DPD model, and combines the advantages of LS method and Hammerstein model. It can achieve better linearization performances by using simple iterative operations instead of one complex direct calculation. And then they are proved on Matlab software platform. The simulation results demonstrate that the proposed predistortion methods are effective.

Then the dissertation analyzes the hardware implementation of memory polynomial predistorter algorithms. It shows the hardware design scheme and some key technologies. And the performance figure from FPGA hardware platform shows that the proposed predistortion method is effective. Finally, the dissertation makes suggestions for further research of power amplifier linearization technology.

**Key Words:** predistortion algorithm; power amplifier; linearization technology

# 目录

<b>第一章</b>	<b>绪论.....</b>	<b>1</b>
1.1	课题的研究目的和意义.....	1
1.2	国内外研究现状和发展趋势.....	2
1.3	本文的主要工作.....	3
1.4	本文的内容安排.....	4
<b>第二章</b>	<b>功率放大器的特性和模型.....</b>	<b>5</b>
2.1	功率放大器的技术指标.....	6
2.2	功率放大器的非线性特性和记忆效应.....	9
2.3	功率放大器的模型研究.....	13
2.4	本章小结.....	19
<b>第三章</b>	<b>功率放大器的线性化技术.....</b>	<b>20</b>
3.1	主要的线性化技术.....	20
3.2	基带预失真技术.....	25
3.3	本章总结.....	30
<b>第四章</b>	<b>基带自适应预失真算法的改进与仿真.....</b>	<b>31</b>
4.1	经典预失真算法.....	31
4.2	LS/SVD 精简改进算法.....	34
4.3	基于 Hammerstein 模型的 LS 迭代改进算法.....	36
4.4	预失真算法的仿真与性能比较.....	38
4.5	本章总结.....	46
<b>第五章</b>	<b>基带预失真技术的硬件设计与实现.....</b>	<b>47</b>
5.1	基带预失真技术的系统设计.....	47
5.2	基带预失真技术的实现环境.....	48
5.3	基带预失真算法的硬件设计与实现.....	51
5.4	本章总结.....	62
<b>第六章</b>	<b>总结与展望.....</b>	<b>63</b>

6.1 总结 .....	63
6.2 展望 .....	63
参考文献 .....	65
在读期间发表的论文 .....	67
致谢 .....	68



## Content

<b>Chapter 1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>1</b>
1.1	Significance and purpose of research .....	1
1.2	Previous research.....	2
1.3	Main work .....	3
1.4	Organization of paper .....	4
<b>Chapter 2</b>	<b>Characteristics and Model of PA.....</b>	<b>5</b>
2.1	Technical indexes of PA.....	5
2.2	Nonlinearity and memory effect.....	9
2.3	Study of PA model.....	13
2.4	Summary .....	19
<b>Chapter 3</b>	<b>Linearization technology of PA .....</b>	<b>20</b>
3.1	Main linearization technology .....	20
3.2	Digital predistortion technology.....	24
3.3	Summary .....	30
<b>Chapter 4</b>	<b>Software Design and Simulation .....</b>	<b>31</b>
4.1	Classical predistortion algorithm.....	31
4.2	LS/SVD simplify algorithm .....	34
4.3	LS iterative algorithm .....	36
4.4	Simulation and comparison of algorithms .....	38
4.5	Summary .....	46
<b>Chapter 5</b>	<b>Hardwar Design and Implementation.....</b>	<b>47</b>
5.1	Design of system.....	47
5.2	Environment of system.....	48
5.3	Hardware design and implementation .....	51
5.4	Summary .....	62
<b>Chapter 6</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>63</b>

<b>6.1 Conclusion.....</b>	<b>63</b>
<b>6.2 Prediction .....</b>	<b>63</b>
<b>Reference .....</b>	<b>65</b>
<b>The paper published .....</b>	<b>67</b>
<b>Acknowledgement .....</b>	<b>68</b>

## 第一章 绪论

### 1.1 课题的研究目的和意义

数字移动通信技术的迅速发展,无线用户的飞速增长以及宽带通信业务的迅猛开展,对无线信道的容量和传输速率的要求越来越高。为了节省有限的频谱资源,在有限的频谱范围内容纳更多的通信信道,现代无线通信系统广泛采用频谱利用率更高的传输技术,如频分多路(FDMA)、时分多路(TDMA)、码分多路(CDMA)、多载波码分多路(CDMA-MC)以及正交频分多路(OFDM)等。而在信道宽度减小、频谱利用率提高的同时,随之而来的问题是带外辐射的增加,导致对邻信道的干扰。出现这种情况的主要原因是通信系统中存在很多非线性器件,特别是基站收发系统中的功率放大器。由于功率放大器的非线性特性直接影响着这些通信系统的性能参数和技术指标,所以功率放大器的线性化技术在现代通信中的地位越来越突出,应用越来越广泛。

影响功率放大器非线性的因素除了输入信号功率和带宽之外,功率放大器本身所具有的记忆特性也是一个不可忽视的方面。所谓“记忆”是指系统的输出不仅与当前的输入有关,还与过去的输入有关。它是由功率放大器内在的物理特性,如元器件的电记忆效应和热记忆效应<sup>[1]</sup>等所产生的。在高效数字调制方案中,功率放大器的线性度对信号包络频率的变化非常敏感。信号包络频率的变化不仅会引起输出信号非连续的幅度和相位失真,还会引起输出频谱中互调失真以及上下边带的不对称性。平滑的记忆效应对功率放大器本身并没有损害,10-20度的相位旋转或者小于0.5dB的幅度变化都对器件的非线性失真特性没有很大的影响<sup>[2]</sup>。然而,当前采用的许多信号调制方式,如3G的三大标准技术之一的WCDMA,采用非恒定包络调制,且有较大的峰均功率比(PAR)。因此功率放大器的记忆效应严重限制了线性化技术可实现的效果。实际上,由于记忆效应,许多线性化技术都不能发挥应有的效果。

所以,研究带有记忆效应的功率放大器的非线性失真原理,对准确构建功率放大器模型有重要的指导意义。针对记忆效应,提出相应的功率放大器的线性化解决方法,可以大大提高放大器线性化技术的有效性。因此,本课题的研究具有重要的理论及实际应用价值,具有广阔的发展前景。

## 1.2 国内外研究现状和发展趋势

线性化技术自诞生以来,已用于卫星通信、蜂窝移动通信等各个领域。随着各种形式的通信业务的增长,对高线性功率放大器的需求也日益迫切。因此,国内外对高功率放大器的线性化研究已经成为一个热点。随着数字化进程的推进,数字信号处理技术也被引入信号传输处理方面,这样就可以采用更为合适的算法,从而提高系统的线性化性能。

早在上个世纪二十年代,贝尔实验室的 Harold S Black 就发明了前向网络法和负反馈技术,并应用于放大器的设计,有效地减小放大器失真。但是这些技术只是对器件本身进行调整,并且只是应用在模拟条件下,效率很低。随着无线通信技术和数字技术的大量应用,射频功率放大器的线性化技术得到飞速发展,到上世纪七、八十年代涌现出一些新的线性化技术,研究人员也将线性化技术从通信器件的设计扩展到通信系统的设计。

围绕着功率放大器的线性化课题,人们已经提出了各种各样的算法<sup>[3]</sup>,主要分为:负反馈法(Feedback)、前馈法(Feed-forward)、功率回退法(Back-Off)、非线性器件法(LINC)以及预失真法(Pre-distortion)等。其中,负反馈技术实现起来最简单,在低频段使用方便,而在高频移动通信和微波段,反馈环路的相移很难控制,并且只适用于窄带系统中,无法满足宽带信号的线性化性能要求;前馈技术能很好地应用在宽带系统中,稳定性能好,但技术要求高,制造成本高,随着器件特性的变化,线性化性能将逐渐劣化;功率回退法是一种简单、可靠的线性化技术,但是却限制了实际输出功率,降低了功率放大器的效率;非线性器件法是将输入信号变成恒包络信号再由放大器放大,它的操作复杂,对器件特性的漂移敏感,并且不具备自适应的特性;预失真法是当前应用较多的一种技术,具有稳定、高效、宽带宽和自适应等优势,已经成为目前研究的热点。

从只传单语音业务的 2G 无线通信系统发展到现在的业务的数据业务的 3G 无线通信系统,系统容量增加,期望能够提供高数据速率的通信业务。这就要求终端和移动通信基站具有更大的带宽和功率。新的传输格式和调制格式,都具有较高的峰均功率比( $>10\text{dB}$ ),其信号包络有较大的波动。这些技术的采用,加重了功率放大器的非线性和记忆效应对信号传输的影响。在这种情况下,功率放

大器既需要高输出功率，又要具有高线性度，才能满足现代无线通信的要求。例如，根据第三代伙伴项目组（3GPP）要求，WCDMA 基站的平均输出功率应该在 20W 且要求最大邻信道功率比(ACPR)在 5MHz 带宽范围内应该 $\geq 45\text{dBc}$ ，10MHz 带宽范围内应该 $\geq 50\text{dBc}$ <sup>[4]</sup>。

目前采用的传统功率放大器已经不能很好地满足这些要求，如何开发新型的功率放大系统是目前功率放大器研究的主要目标。为了争夺未来的无线通信市场，目前，不论是学术界还是工业界，都十分关注射频功率放大器的线性化技术研究。IEEE 近年关于该领域的论文，以每年约百分之十几的速度增长。国际上一些专门的高技术设备研究公司，无线通信行业的各大巨头，如：Nokia，Motorola 等，都纷纷投入大量的人力物力进行放大器线性化技术的研究。

当前，我国在放大器的线性化研究领域还处于萌芽阶段，无法满足对放大器线性化的需求。国内只有少数有实力的通信厂商对此进行了研究，如中兴通信，华为技术等，都投入了大量的人力物力进行研究开发，但是由于专利的限制和保护，这些技术都没有对外界公开。各个高校的无线通信专业也都热衷于这方面的研究，相继获得了许多研究成果。相信随着市场竞争的需求，会有越来越多的研究者投入到高线性化功率放大器的研究和开发上的。

### 1.3 本文的主要工作

随着无线通信容量的增加和高效率调制格式的使用，对宽带功率放大器的性能提出了更高的要求，不但要求功率放大器具有高的输出功率和高的效率，还需要保证足够的线性度。放大器的非线性是固有的，非线性引起失真，造成带内误码率的升高，带外频谱的再生，严重影响了通信的质量。如何将非线性功率放大器线性化，降低非线性失真，提高通信质量已经成为无线通信设计必须重视的问题。线性化技术，已经成为当今研究的热点。

本文研究主要针对第三代移动通信基站功率放大器进行研究，因此文中提到的功率放大器都是宽带高功率放大器。主要研究目标：在详细分析宽带功率放大器非线性特性和记忆效应的基础上，设计应用于宽带高功率放大器的数字预失真系统。

用于功率放大器的线性化技术很多，其中的预失真技术以它的优越性成为目前研究的热点。预失真有模拟预失真和数字预失真两种类型，模拟预失真技

术和实现系统相对简单，但实现的预失真效果相对较差。数字预失真技术与实现系统由于采用了数字信号处理（DSP）技术和自适应技术，尽管实现相对复杂，但性能上有很大的提高。

本课题致力于带记忆效应的功率放大器的线性化工作，采用自适应基带预失真技术。不仅要求理论上的研究与创新，更需要在仿真和实现上具有一定的指导意义。

论文详细介绍了目前的各种放大器线性化技术，特别针对预失真技术进行了深入的分析和研究。针对当前比较热门的基带预失真技术，比较预失真技术中查询表法和函数多项式法的优缺点，分析其克服功率放大器非线性特性。在分析、比较当前已有的两种经典预失真算法的基础上，改进提出两种具有较好线性化性能的预失真算法：LS/SVD 精简改进算法和基于 Hammerstein 模型的 LS 迭代改进算法。新算法克服了以往算法中运算量大，资源需求高的缺点，具有实现方式简单，运算复杂度低，资源需求少的优点，并且易于硬件实现。结合 MATLAB 仿真平台，实现预失真线性化性能的软件仿真。仿真验证了新算法的有效性，对功率放大器具有较好的线性化性能。

最后，在硬件平台上实现了新提出的预失真算法。建立了整体系统框架，分析了关键技术的硬件实现原理，并对其进行了功能仿真，确认整个算法可以满足硬件实现的需要，验证了新算法的可行性。

## 1.4 本文的内容安排

论文共分为六章。第一章介绍本课题研究的意义和国内外研究现状，简要说明本文的研究工作；第二章介绍功率放大器的特性和模型，讨论了不同放大器模型的应用范围，比较了各自的优缺点；第三章介绍目前各类线性化技术，详细介绍了本课题所采用的预失真技术，分析了预失真技术两种方法，即查询表法和函数多项式法的优缺点；第四章在分析当前流行的经典预失真算法的基础上，提出两种基于函数多项式的预失真算法，并在 Matlab 软件平台上进行仿真，比较验证新算法达到的线性化性能；第五章给出了系统在硬件实现上的工作，描述基带预失真系统的设计与实现，详细介绍了关键技术 in FPGA 上的实现，对系统进行功能仿真，在硬件平台上验证了提出的预失真算法对功率放大器实现的线性化性能；最后第六章给出论文总结，并对进一步的工作做出了展望。

## 第二章 功率放大器的特性和模型

在现代无线通信的收发系统中，发射机是一个重要的组成部分，用于完成基带信号对载波的调制，将生成的通带信号搬移到所需的频段上，再经过功率放大器放大后送往天线中发射。它一般包括振荡器、调制器、上变频器、滤波器和功率放大器等部件。射频功率放大器位于发射机的末级，用于将射频信号放大到所需要的功率值，从而保证一定区域内的接收机都可以收到满意的信号电平。

功率放大器是无线通信系统中的关键器件，也是系统中最主要的非线性器件。作为一个主要的非线性失真源<sup>[5]</sup>，一般而言，当输入功率较小时，功率放大器能够保持良好的线性度。但在实际应用中，为了提高功率放大器的效率，总是希望放大器工作在饱和点附近，此时功率放大器输出的非线性问题就会非常严重<sup>[6]</sup>。功率放大器的非线性特性会使传输信号产生畸变和失真，会造成通信质量下降，误比特率增加，干扰邻近信道，所以在设计无线通信系统时，一定要考虑功率放大器非线性引起的失真，采用一定的方法来减少非线性失真。

如果功率放大器输入信号的带宽足够小的话，可以把其看成无记忆非线性系统，但随着输入信号带宽的增加（诸如 WCDMA 宽带应用），无线通信的高功率放大器的记忆效应就会越来越明显，此时功率放大器除了表现出普通非线性特性外，还呈现出很强的记忆效应，即放大器的输出不仅依赖于当前的输入，还依赖于历史的输入。对于有记忆的放大器，由于记忆效应的存在导致频带内互调失真分量变化，显著降低了功率放大器线性化技术的性能。为了改善功率放大器的线性化性能，有必要对放大器的记忆效应进行深入研究，提出有针对性的措施以减小记忆效应对线性化的影响。

在分析功率放大器系统时，建立功率放大器的模型是一项重要的工作。建模是采用数学模型对功率放大器的特性加以描述，以便定量地分析其非线性以及记忆效应对通信系统造成的影响，从而制订出合理的线性化方案。针对本文重点讨论的预失真线性化技术，建立合理、有效的功率放大器模型有特别重要的意义。本章分析了功率放大器的非线性及记忆效应对通信系统所造成的影响，系统介绍了功率放大器的无记忆模型和有记忆模型，为本文的软件仿真奠定基础。

## 2.1 功率放大器的技术指标

功率放大器线性化性能的优劣需要具体的量化指标进行衡量，即线性度评价指标。描述功率放大器的非线性特性通常采用下面的几个技术指标：

### 2.1.1 1dB 压缩点 ( $P_{1dB}$ )

任何放大器都有一个最大输出功率的限制，称为饱和输出功率。在这个功率点上，放大器的效率最高，但线性度却很差。当晶体管工作在小信号状态下时，其功率增益值保持不变，此时的增益称为“线性增益”  $G_0$ 。随着输入信号的逐渐增大，晶体管开始进入非线性工作状态，此时的功率增益将随着输入信号的增加而逐渐下降，当增益下降到比线性增益低 1dB 时，此时的功率增益称为“1dB 压缩点增益”  $G_{1dB}$ ，对应的输入、输出功率分别称为“压缩点输入功率”  $P_{i1dB}$  和“压缩点输出功率”  $P_{o1dB}$ 。

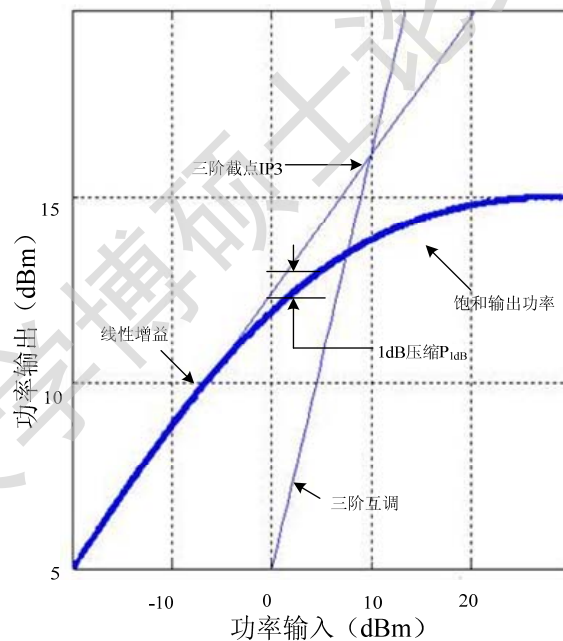


图 2.1  $P_{1dB}$  和  $IP3$

如图 2-1 所示，对功率放大器的线性度而言， $P_{o1dB}$  越大越好，故有时  $P_{o1dB}$  也称作线性输出功率，它是决定失真大小的最大输出功率。从中可以看出，饱和输出功率点与 1dB 压缩点之间的距离减小也就意味着放大器的非线性区域压缩，线性度得到改善<sup>[7]</sup>。在某种程度上可以认为，将放大器的失真维持在一个可接受范围内的最简单的方法就是让放大器工作在远离饱和输出功率的功率点



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库